

УДК 678.742.2-405.8

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ВСПЕНИВАНИЯ ВТОРИЧНОГО  
ПОЛИЭТИЛЕНА**  
**MATHEMATICAL MODEL FOR FOAMING RECYCLED POLYETHYLENE**

**Светлана Ивановна Бухкало, Сергей Петрович Иглин, Оксана Игоревна Ольховская**  
**Svetlana I. Buhkhalo, Sergey P. Iglin, Oksana I. Olkhovskaya**

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
Харьков, Украина  
National Technical University «KhPI», Kharkiv, Ukraine  
(e-mail: bis.khr@gmail.com)*

*Аннотация:* Рассмотрены некоторые особенности повышения эффективности использования ТБО на комплексном предприятии, которое может обеспечивать все свои энергетические потребности самостоятельно. Исследования направлены на изучение таких вопросов, как разработка моделей утилизации-модификации полимерной части ТБО. При этом учитывались факторы выбора научно-обоснованных методов переработки и утилизации полимеров; разработка необходимых технологических схем и оборудования для переработки полимерных отходов; выбор предприятий для реализации утилизации полимеров и вида энергетических ресурсов для реализации этих проектных решений.

*Abstract:* Some features of the possibilities of solving evidence-based problems of improving the use of wastes of different industries on a complex enterprise that can provide all its energy needs alone. The problem of wastes utilization and recycling is present as complex research and analysis of energy- and resource saving processes for treatment of polymer wastes of various origin. The research focused on the study of issues such as the development of models of waste-modifying polymer. The investigation are focused in researching such problems as selection of scientific based methods of wastes to be utilized or recycled; the development of appropriated process flow sheets and choice of modifications additives and equipment for polymers waste recycling. The choice of appropriate plants with selected energy resources is very important for projects realization.

*Ключевые слова:* интегрированные энерго- и ресурсосберегающие технологии, объект научно-обоснованной технологии, модели вспенивания.

*Keywords:* integrated energy technologies, evidence-based methods, wastes conversion and recycling.

Увеличение объемов выпуска полимерных материалов различного ассортимента предполагает обсуждение путей реализации современных эффективных интегрированных энерго- и ресурсосберегающих технологий и оборудования в базовых отраслях народного хозяйства по переработке твердых бытовых отходов (ТБО), в частности полимерной ее части [1-5]. С целью создания в промышленности нового ассортимента товаров народного потребления на основе научно-обоснованного анализа основных направлений разработки инновационных полимерных материалов из отходов применялись методы математического моделирования [6-8]. С целью совершенствования технологии утилизации полимерных полиэтиленовых отходов как части ТБО исследовалась возможность получения вспененного вторичного полиэтилена (ВВПЭ). Для повышения качества изделий из ВВПЭ необходимо получить и исследовать математические модели влияния факторов: 1) изменения свойств в процессе эксплуатации полиэтиленовой пленки и 2) технологических параметров процесса вспенивания для разновидностей ассортимента отраслей использования изделий. При разработке процесса вспенивания вторичного полиэтилена, полученного на основе объекта исследования – полиэтиленовой пленки (табл. 1), прошедшей длительную эксплуатацию, использовали методы полного факторного эксперимента (ПФЭ).

**Таблица 1. ПФЭ для трех функций отклика**

№	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,058	0,062	0,064
2	+	-	+	+	-	-	+	-	0,095	0,095	0,096
3	+	+	-	+	-	+	-	-	0,064	0,058	0,061
4	+	-	-	+	+	-	-	+	0,387	0,391	0,398
5	+	+	+	-	+	-	-	-	0,086	0,092	0,093
6	+	-	+	-	-	+	-	+	0,387	0,398	0,385
7	+	+	-	-	-	-	+	+	0,584	0,585	0,593
8	+	-	-	-	+	+	+	-	0,585	0,595	0,590

Исследовалась кажущаяся плотность ВВПЭ, принятая в качестве выходного параметра  $Y$  (%). Факторами (табл. 1) являлись параметры проведения процесса вспенивания:  $X_1$  – количество активирующего комплекса, %;  $X_2$  – температура вспенивания, °C;  $X_3$  – время выдержки при температуре вспенивания, мин. Исходные данные:  $X_{10}=3$ ;  $X_{20}=170$ ;  $X_{30}=15$ ;  $\Delta X_1=1$ ;  $\Delta X_2=10$ ;  $\Delta X_3=5$ . Для первой функции отклика  $Y_1$  записываем линейную модель:

$$Y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (1)$$

которая дает такие значения коэффициентов и их доверительные интервалы (табл. 2)

**Таблица 2. Параметры линейной модели и их доверительные интервалы**

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
$b_0$	0,1574	0,2807	0,4041
$b_1$	-0,2061	-0,0828	0,0406
$b_2$	-0,2476	-0,1243	-0,0009
$b_3$	-0,2531	-0,1298	-0,0064

С доверительной вероятностью 95% доверительный интервал для  $b_1$  включает ноль и уточненная модель имеет вид (2):

$$Y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (2)$$

которая имеет такие параметры и доверительные интервалы (табл. 3).

Введение еще одной, восьмой базисной функции  $X_1X_2X_3$ , превращает задачу в интерполяционную (3): функция отклика  $Y_1$  будет точным аналитическим выражением:

$$Y_1 = 0,2807 - 0,0828x_1 - 0,1243x_2 - 0,1298x_3 - 0,0017x_1x_2 - 0,0073x_1x_3 + 0,0497x_2x_3 + 0,0732x_1x_2x_3, \quad (3)$$

Доверительных интервалов нет.

**Таблица 3. Параметры уточненной модели  $Y_1$  и доверительные интервалы для них**

Параметр	Нижняя граница	Значения	Верхняя граница
$b_0$	-0,6500	0,2807	1,2115
$b_1$	-0,2061	-0,0828	0,8480
$b_2$	-0,2476	-0,1243	0,8065
$b_3$	-0,2531	-0,1298	0,8010
$b_4$	-0,2061	-0,0017	0,9290
$b_5$	-0,2476	-0,0073	0,9235
$b_6$	-0,2531	-0,0497	0,9805

Интерполяционная задача для полной модели функция отклика  $Y_2$  будет аналитическим выражением:

$$Y_2 = 0,2845 - 0,0852x_1 - 0,1228x_2 - 0,1330x_3 - 0,0005x_1x_2 - 0,0063x_1x_3 + 0,0497x_2x_3 + 0,0745x_1x_2x_3, \quad (4)$$

интерполяционная задача для полной модели функция отклика  $Y_3$  будет аналитическим выражением:

$$Y_3 = 0,2850 - 0,0823x_1 - 0,1255x_2 - 0,1303x_3 - 0,0013x_1x_2 - 0,0100x_1x_3 + 0,0507x_2x_3 + 0,0750x_1x_2x_3, \quad (5)$$

Представленный ПФЭ для трех функций отклика показывает соответствует выбранным критериям относительной погрешности для экспериментальных точек соответственно для полиэтилена он составляет 4–5%.

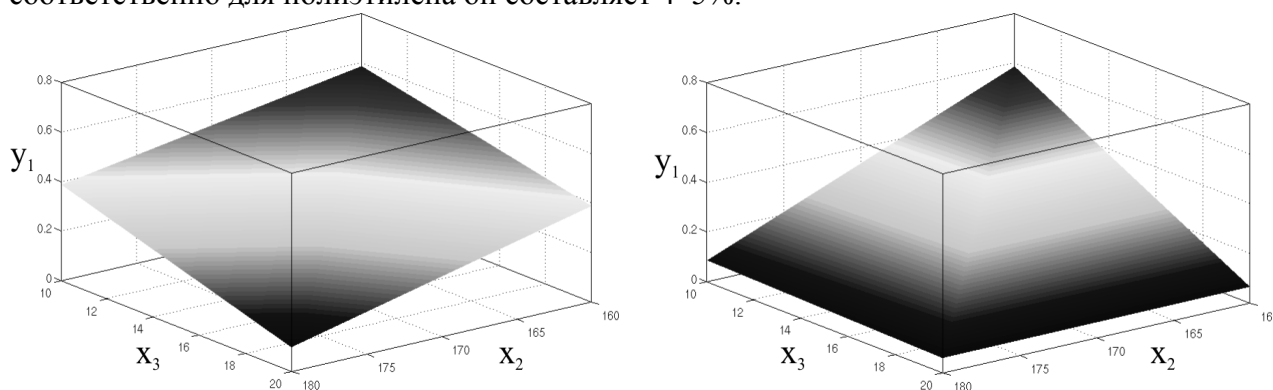


Рис. 1. Модели влияния параметров вспенивания для функции отклика  $Y_1$ .

Уравнения (3–5) определяют плоскость для функции отклика  $Y_1$  в пространстве  $X_1$  – количество активирующего комплекса, %;  $X_2$  – температура вспенивания, °C;  $X_3$  – время выдержки при температуре вспенивания, мин. Очевидно, что оптимальный набор параметров переработки (вспенивания) будет обусловлен координатами плоскостей (рис. 1), где  $Y_1 = f(X_2X_3)$  соответственно справа при  $X_1 = 2$ ; слева –  $X_1 = 4$ .

Исследования направлены на изучение таких вопросов, как разработка моделей утилизации-модификации полимерной части ТБО с учетом результатов, проведенных ранее работ [9–11]. На практике, имея исходные данные по экструзионному оборудованию, т.е. технические характеристики червяка и параметрам вспенивания вторичного вспенивания: диаметр, шаг нарезки, высоту витка, число витков, ширина гребня витка, число заходов червяка, число оборотов червяка, сопротивление головки, радиальный зазор, количество активирующего комплекса;  $X_2$  – температура вспенивания;  $X_3$  – время выдержки при температуре вспенивания находим целое значение кажущейся плотности ВВПЭ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рэнби Б. Рабек Я. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров. – М.: Наука. 1978. – С. 65–69.
2. Бухкало С.И. Изменение свойств в процессе эксплуатации пленки и направления модификация вторичного полиэтилена: дис. канд. техн. наук: 25.01.88 / Бухкало Светлана Ивановна. – М., 1988. – 150 с.
3. Бухкало С.И. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах (інноваційні заходи) [текст] підручник. Київ «Центр учбової літератури»: 2014, 456 с.
4. Бухкало С.И. Ресурсосберегающие технологии использования полимерных отходов / Интегрированные технологии та энергосбереження // – Х.: НТУ «ХП». 2001. – № 2. – С. 106–112.
5. Бухкало С.И. К вопросу энергосбережения процесса агломерирования полимерной упаковки / Интегрированные технологии та энергосбереження // 2005. – № 2. – С. 29–33.

6. Бухкало С.И. Деякі властивості полімерних відходів у якості сировини для енерго- і ресурсозберігаючих процесів // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХП». 2014. – № 4. – с. 29–33.
7. Бухкало С.И. Основні складові комплексних підприємств енергетичного міксу // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП». 2015. – № 7 (1116). – с. 3–21.
8. Товажнянский Л.Л., Кошелева М.К., Бухкало С.И. Общая химическая технология в примерах, задачах, лабораторных работах и тестах (уч. пособие) / Москва ИНФРА-М, 2015. С. 447.
9. Бухкало С.И. Моделі енергетичного міксу для утилізації полімерної частки ТПВ // Вісник НТУ «ХП». – Х.: НТУ «ХП». 2016. – № 19 (1191). – с. 23–32.
10. Бухкало С.И., Іглін С.П. Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів / Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХП». 2016. – № 3. – с.52–57.
11. Бухкало С.И. Інноваційні технології використання відходів. 4-й міжн. конгрес Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 21–23 вересня 2016 р., Львів. 2016, – с. 111.